Untersuchungen über die spezifische Ionisation von schnellen Elektronen

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften

der

Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Bayerischen Julius-Maximilians-Universität zu Würzburg

vorgelegt von

Dipl.-Physiker Rudolf Decher

aus Würzburg

Würzburg 1954

Druck der Universitätsdruckerei H. Stürtz AG., Würzburg

Berichterstatter: Prof. Dr. H. Kulenkampff

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Januar 1954

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Sonderdruck aus
„Zeitschrift für Physik", 137. Band, 5. Heft, Seite 638—648 (1954)

Springer-Verlag, Berlin - Göttingen - Heidelberg

Zeitschrift für Physik, Bd. 137, S. 638—648 (1954).

Untersuchungen zur Ionisierungswirkung schneller Elektronen*.

Von

R. Decher und H. Kulenkampff.

Mit 6 Figuren im Text.

(Eingegangen am 13. Februar 1954.)

* Würzburger Dissertation (R. Decher).

An einer kleinen Elektronenschleuder der Siemens-Reiniger-Werke wurde für Elektronen einer kinetischen Energie von 4,9 MeV mittels Ionisationskammer und Auffänger die totale spezifische Ionisation N_t und mittels einer Nebelkammer die primäre spezifische Ionisation N_p in Luft bestimmt. Es ergab sich, umgerechnet auf 760 Torr und 0° C: $N_t = 62{,}5\ \mathrm{cm}^{-1}$, $N_p = 25{,}4\ \mathrm{cm}^{-1}$.

Wir hatten die Möglichkeit, an der in der Medizinischen Universitätsklinik in Erlangen befindlichen kleinen Elektronenschleuder der Siemens-Reiniger-Werke einige neue Messungen zur Ionisierungswirkung von Elektronen bei einer Energie von rund 5 MeV auszuführen. Diese Energie liegt in der Nähe des Ionisationsminimums, für das genauere Zahlenwerte von Interesse sind, besonders im Hinblick auf zum Teil erhebliche Differenzen zwischen bisherigen Messungen und der theoretischen Berechnung.

Bei der Elektronenschleuder der Siemens-Reiniger-Werke ist es möglich, den Elektronenstrahl herauszuführen [*1*]. So konnte einerseits mittels Ionisationskammer und Auffänger die totale spezifische Ionisation N_t, andererseits mittels einer Nebelkammer die primäre spezifische Ionisation N_p bestimmt werden; unter spezifischer Ionisation ist dabei wie üblich die pro cm Weglänge im Gas insgesamt bzw. primär gebildete Anzahl Ionenpaare zu verstehen.

Die Messungen wurden an Luft ausgeführt. Eine wünschenswerte Erweiterung auf andere Gase war bisher nicht möglich, weil die Elektronenschleuder nur zu beschränkten Zeiten zur Verfügung stand. Außerdem mußte unsere Meßanordnung transportabel eingerichtet und den örtlichen Verhältnissen in der Klinik angepaßt werden.

1. Bestimmung der totalen spezifischen Ionisation.

a) Meßverfahren.

Die Bestimmung der totalen spezifischen Ionisation N_t erfordert die gleichzeitige Messung der Anzahl Ionenpaare, die auf einer bekannten Weglänge des Elektronenstrahls erzeugt werden, sowie der Anzahl der

Elektronen, welche diese Ionisation hervorrufen. Die Stärke des Elektronenstrahles ist bei der Elektronenschleuder so groß, daß die Elektronenzahl unmittelbar mit einem Auffänger gemessen werden kann.

Es ergibt sich damit eine Anordnung, die schematisch in Fig. 1 dargestellt ist. Von den aus der Elektronenschleuder ES kommenden Elektronen wird durch die Blenden B_1 und B_2 ein enges Bündel ausgeblendet. Dieser Elektronenstrahl durchläuft dann die Ionisationskammer JK und wird schließlich im Auffänger (FARADAY-Käfig) FK aufgefangen.

Der Ionisationsstrom J_1 und der Elektronenstrom J_2 werden nach Verstärkung durch Elektrometerröhren mit zwei Spiegelgalvanometern gemessen. Aus dem Verhältnis beider Ströme und der Länge L der Ionisationskammer ergibt sich unmittelbar die Zahl der Ionenpaare pro cm, d. h. die totale spezifische Ionisation

$$N_t = \frac{J_1}{J_2} \cdot \frac{1}{L}.$$

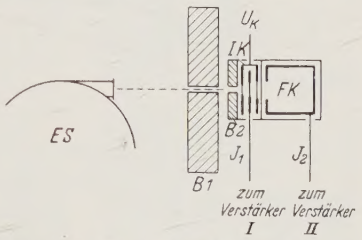

Fig. 1. Schema der Anordnung zur Messung der totalen spezifischen Ionisation.

Um Störungen durch Röntgenbremsstrahlung hinreichend klein zu halten, ist die Blende B_1 aus einer 10 cm starken Paraffinplatte angefertigt. Die Blende B_2 und alle sonstigen Teile der Apparatur, die von Elektronen getroffen werden können, bestehen aus Aluminium.

b) Ionisationskammer und Auffänger.

Die Konstruktion der Ionisationskammer wurde durch die Überlegung bestimmt, daß alle Elektronen, welche die Ionisationskammer durchlaufen haben, auch in den Auffänger gelangen müssen. Auf dem Wege durch die Ionisationskammer erfährt aber der Elektronenstrahl durch Streuung eine zunehmende Querschnittsvergrößerung. Die Eintrittsöffnung des Auffängers darf jedoch nicht zu groß sein, weil sonst ein merklicher Teil rückdiffundierender oder sekundärer Elektronen ihn wieder verlassen kann. Die Ionisationskammer muß also möglichst kurz sein. Bei einer im Hinblick auf Sättigungsstrom günstigen Anordnung mit elektrischem Transversalfeld läßt sich die erforderliche kurze Bauweise nicht gut verwirklichen, weil zur exakten Abgrenzung der Meßstrecke Schutzelektroden erforderlich sein würden.

Es wurde deshalb für die Ionisationskammer eine Konstruktion gewählt, die in Fig. 2 im Schnitt dargestellt ist. Der Elektronenstrahl durchsetzt drei Aluminiumfolien f von je 0,6 μ Stärke. Die beiden äußeren Folien begrenzen die Meßstrecke; an ihnen liegt die Kammerspannung U_K. Die mittlere Folie ist zur Messung des Ionisationsstromes

mit dem Gitter einer Elektrometerröhre verbunden und über den Gitterableitwiderstand geerdet. Der Verbreiterung des Elektronenstrahles wird durch zunehmenden Foliendurchmesser (7, 10 und 14 mm) in Richtung auf den Auffänger Rechnung getragen. Die Länge der Meßstrecke im Ionisationsraum beträgt 2,20 cm. Die mittlere Folie wird von einem Messingring getragen, der selbst an drei Stäbchen mit Bernsteinisolatoren gehalten wird. Zwecks Erzielung eines homogenen Feldes ist dieser Folienträger von einem geerdeten Schutzring umgeben.

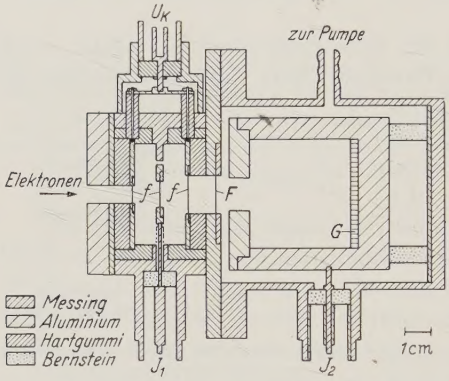

Fig. 2. Ionisationskammer und Auffänger.

Der Auffänger ist unmittelbar hinter der Ionisationskammer angebracht. Er besteht aus einem starkwandigen Aluminiumzylinder mit einem Boden von 12 mm Stärke; dies ist ausreichend, um alle Elektronen abzubremsen. Vorgelagert ist noch eine Graphitplatte G, welche die Rückdiffusion vermindern soll. Aus dem Verhältnis des Durchmessers der Eintrittsöffnung zur Tiefe des Auffängers ergibt sich, daß nicht mehr als 1% der rückdiffundierenden und sekundären Elektronen wieder austreten kann. Der Auffänger ist zur Messung des Elektronenstromes direkt mit dem Gitter einer zweiten Elektrometerröhre verbunden.

Es zeigte sich, daß der ganze Auffänger evakuiert werden mußte, da er sich gegenüber dem geerdeten Gehäuse auf dem negativen Potential der Gittervorspannung (−3 V) befindet. Bei Luftfüllung würde deshalb der Auffänger die auf der davor befindlichen Strecke erzeugten positiven Ionen sammeln, wodurch der gemessene Elektronenstrom sehr stark verfälscht wird. Er wurde deshalb mittels einer 20 μ starken Al-Folie F von der Ionisationskammer abgetrennt, die zugleich eine elektrische Abschirmung bewirkt.

c) Verstärker.

Die Messung des Ionenstromes J_1 und des Elektronenstromes J_2 erfolgte mit zwei Gleichstromverstärkern, die ganz gleichartig gebaut waren und sich nur durch verschieden große Gitterableitwiderstände unterschieden. Das Schaltschema für einen dieser Verstärker ist in Fig. 3 dargestellt.

Die Verstärkerröhre ist eine Elektrometerröhre, Typ 4060 von Philips. Die Heizung erfolgte aus einem 2 V-Akkumulator größerer

Kapazität, als Anodenspannung, Gitterspannung sowie als Spannungsquelle zur Kompensation des Anodenruhestromes dienten kleine Trockenbatterien. An die Konstanz der Gittervorspannung werden höchste Anforderungen gestellt. Es wurde deshalb davon abgesehen, die Gitterbatterien mit einem Spannungsteiler zu belasten und die Spannung fest zu -3 V gewählt. Im Anodenkreis jeder Röhre liegt ein Spiegelgalvanometer G mit einer Empfindlichkeit von $1 \cdot 10^{-8}$ Amp pro mm/m. Die Gitterableitwiderstände bei den beiden Verstärkern (Größenordnung 10^8 bzw. $10^{10}\,\Omega$) waren so bemessen, daß die Lichtzeiger der beiden Galvanometer während der Messung etwa gleich große Ausschläge zeigten. Zur Auswertung der Messungen mußte dann nur das Verhältnis der beiden Widerstände genau bekannt sein.

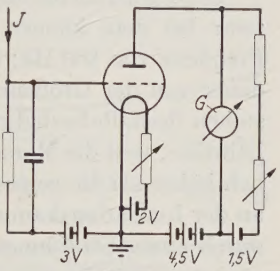

Fig. 3.
Schaltung der Elektrometerröhre.

Beim Betrieb der Elektronenschleuder sind kurzzeitige Schwankungen des Elektronenstromes unvermeidlich. Um die dadurch hervorgerufenen Stromstöße an den Spiegelgalvanometern aufzufangen, wurden parallel zu den Gitterableitwiderständen hochisolierende Styroflexkondensatoren gelegt, deren Kapazität so bemessen war, daß die Zeitkonstante jedes Verstärkers etwa $R \cdot C = 10$ sec betrug.

Die Stromempfindlichkeit des Verstärkers für den Elektronenstrom betrug $2{,}5 \cdot 10^{-14}$ Amp pro mm/m. Die Nullpunktstabilität war bei dieser Empfindlichkeit auch ohne Brückenschaltung noch ausreichend. Nach einer Anlaufzeit von etwa einer Stunde stellte sich ein ausreichender stabiler Zustand ein.

Starke Störfelder in der Umgebung der Elektronenschleuder erfordern eine saubere Abschirmung aller Teile. Dabei war der Abschirmkasten mit den Elektrometerröhren und Zubehör zwecks kurzer Leitungsdurchführung unmittelbar an die Ionisationskammer und den Auffänger angebaut. Die Spiegelgalvanometer mußten aus Strahlenschutzgründen in größerem Abstand, gleichfalls in Abschirmkästen, aufgestellt werden; die Verbindungen erfolgten durch abgeschirmte Kabel. Während des Betriebes der Elektronenschleuder tritt nun in ihrer Umgebung, besonders in Richtung des austretenden Elektronenstrahles, eine harte Röntgenstrahlung auf. Dabei wirkt der Röhrenabschirmkasten mit den Gitterleitungen wegen der Gittervorspannung von -3 V wie eine Ionisationskammer für diese Röntgenstrahlung; die Gitterleitungen sammeln die positiven Ionen und es entsteht ein dem zu messenden Strom entgegengesetzter Galvanometerausschlag von erheblichem Betrage. Eine ausreichende Abschirmung dieser Röntgenstrahlung wäre sehr schwierig, ebenso ließ sich ein Evakuieren des Röhrenabschirmkastens aus

verschiedenen Gründen nicht durchführen. Als sehr brauchbar erwies sich der folgende Weg: Die Elektrometerröhren mit Gitterableitwiderständen, Gitterkondensatoren sowie alle mit dem Gitter verbundenen Leitungen wurden in einen den Abschirmkasten ganz ausfüllenden Ceresinblock eingegossen. Voruntersuchungen hatten gezeigt, daß reines Ceresin einen sehr hohen Isolationswiderstand besitzt; infolgedessen verschwanden durch diese Maßnahme auch alle Isolationsschwierigkeiten bei den Glaskolben der Elektrometerröhren.

d) Messungen und Ergebnis.

Die Elektronenschleuder arbeitet bekanntlich im Impulsbetrieb, und zwar bei dem kleinen Modell der Siemens-Reiniger-Werke mit einer Frequenz von 500 Hz; die einzelnen Strahlungsimpulse haben eine Zeitdauer von der Größenordnung 10^{-6} sec. In der Ionisationskammer bestehen deshalb bezüglich der Rekombination von Ionen besondere Verhältnisse, weil die Momentanstromstärke des Elektronenstromes wesentlich höher als die gemessene mittlere Stromstärke J_2 ist. Die Spannung an der Ionisationskammer soll deshalb mindestens so hoch sein, daß alle durch einen Strahlungsimpuls erzeugten Ionen bis zum Eintreffen des nächsten Strahlungsimpulses abgesaugt sind. Hierfür wäre bei Annahme einer mittleren Ionenbeweglichkeit von 2 cm/sec pro Volt/cm eine Spannung von etwa 250 V erforderlich; einige Messungen über die Abhängigkeit des gemessenen Ionenstromes von der Kammerspannung bei verschiedenen Elektronenstromstärken J_2 ergaben, daß tatsächlich schon bei etwa 150 bis 200 V praktisch Sättigung erreicht ist. Zur Sicherheit wurden alle endgültigen Messungen bei einer noch wesentlich höheren Kammerspannung von 1050 V ausgeführt.

Die Stärke des Elektronenstromes J_2 wurde bei den Messungen von etwa $5 \cdot 10^{-13}$ bis $2 \cdot 10^{-11}$ Amp variiert. Bei etwa 100 Einzelwerten ergaben sich dabei für das Verhältnis J_1/J_2 keine die Fehlergrenzen von etwa ± 1 bis 2% übersteigenden Unterschiede und keinerlei systematischer Gang mit der Stromstärke.

Weiterhin wurden Messungen bei verschiedenen Blendenanordnungen (vgl. Fig. 1) ausgeführt, und zwar

Blende B_1 Paraffin Durchmesser 5 mm

Blende B_1 Paraffin Durchmesser 10 mm

statt B_1 zwei Al-Blenden, Durchmesser 8 bzw. 5 mm.

Der Durchmesser der Blende B_2 (Al) betrug dabei stets 7 mm. Auch hierbei ergaben sich bis auf ± 1% die gleichen Werte für das Verhältnis J_1/J_2.

Das Endergebnis aus rund 100 Einzelmessungen, umgerechnet auf

$$N_l = 62{,}5 \pm 1{,}5 \text{ cm}^{-1}.$$

Die Energie der Elektronen in der Ionisationskammer beträgt 4,9 MeV. Dabei ist der Energieverlust im Austrittsfenster der Elektronenschleuder und auf dem Luftwege bis zur Ionisationskammer berücksichtigt.

Bei einer Energie von 2 MeV sind Bestimmungen der totalen spezifischen Ionisation in Luft von BRODE und BAGLEY [2] sowie von HAZEN [3] an diffundierten Bahnen in einer Nebelkammer ausgeführt worden. Sie ergaben merklich niedrigere Werte, was daran liegen dürfte, daß dichte Ionenhaufen nicht aufgelöst werden. Mit Ionisationskammer und Auffänger haben neuerdings OVADIA, LAUGHLIN, BEATTIE und HENDERSON [4] bei höheren Energien die totale Ionisation in Luft bestimmt; sie fanden $N_t = 61\ \mathrm{cm}^{-1}$ bei 9 MeV und $N_t = 64\ \mathrm{cm}^{-1}$ bei 17,5 MeV.

Diese Werte sind zusammen mit dem von uns gemessenen in Fig. 4 dargestellt. Die eingezeichnete Kurve ist berechnet aus dem mittleren Energieverlust dE/dx und dem Energieverbrauch pro Ionenpaar ε gemäß

$$-dE/dx = \varepsilon \cdot N_t.$$

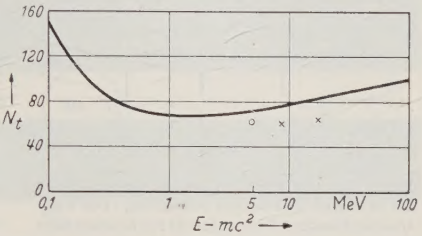

Fig. 4. Verlauf der totalen spezifischen Ionisation. Kurve nach BETHE-BLOCH.

Für Luft ist $\varepsilon = 32$ V/Ionenpaar experimentell gut bekannt; dE/dx wurde nach der BETHE-BLOCHschen Formel (5) berechnet:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi e^4 N}{m v^2}\left(\ln \frac{(E - mc^2) E^2 \beta^2}{2 mc^2 I^2 Z^2} + 1 - \beta^2\right)$$

(N = Anzahl Atomelektronen pro cm^3; IZ = mittlere Ionisierungsenergie mit $I = 11{,}15$ eV für Luft nach R. R. WILSON [6]. Die übrigen Größen haben die übliche Bedeutung).

Für 4,9 MeV entnimmt man der Kurve einen Wert $N_t = 73\ \mathrm{cm}^{-1}$. Der Unterschied von etwa 15% ist größer als die möglichen Fehler unserer Messungen; auch die Werte von OVADIA, LAUGHLIN, BEATTIE und HENDERSON scheinen anzudeuten, daß das Ionisationsminimum etwas niedriger und flacher ist als nach der Theorie, jedoch läßt sich näheres darüber wohl erst nach Ausdehnung derartiger Messungen über einen größeren Energiebereich sagen. Auch ist experimentell bisher nichts darüber bekannt, ob vielleicht die Größe ε in diesem Energiebereich etwas ansteigt.

2. Bestimmung der primären spezifischen Ionisation.

a) Meßverfahren und Apparatur.

Die im Abschnitt 1 behandelte totale Ionisation setzt sich zusammen aus der von den primären Elektronen unmittelbar und der von dabei

auftretenden Sekundärelektronen erzeugten Ionisation. Die Sekundärelektronen haben im allgemeinen sehr kleine Energie und ionisieren nur in sehr geringem Abstand von den primär gebildeten Ionen. Wenn die primären Elektronen eine Nebelkammer nach der Expansion durchlaufen, verhindert die sofort einsetzende Tropfenkondensation ein Auseinanderdiffundieren der Ionen. Von seltenen Fällen größerer Energie der Sekundärelektronen abgesehen, liefern also die sekundär erzeugten Ionen keine von den primären getrennte Nebeltropfen. Die Auszählung der Tropfen längs der Elektronenbahnen ergibt dann die Zahl der pro Zentimeter primär gebildeten Ionen N_p.

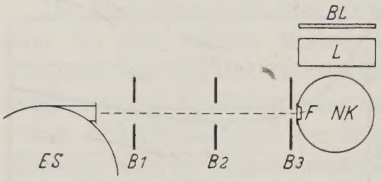

Fig. 5. Schema der Anordnung zur Bestimmung der primären spezifischen Ionisation. (Die Elektronenschleuder ES ist senkrecht zur Zeichenebene zu denken.)

Der Versuchsaufbau ist in Fig. 5 schematisch wiedergegeben. Die Elektronen, die von der Elektronenschleuder ES kommen, gelangen durch ein spaltförmiges Einschußfenster F, welches mit einer 50 μ starken Cu-Folie verschlossen ist, von der Seite her in die Nebelkammer NK. Die Blenden B_1, B_2 und B_3 sorgen dafür, daß nur dieses Einschußfenster von Elektronen getroffen wird und verhindern so die Erzeugung von Sekundärstrahlung in den Metallteilen der Nebelkammer.

Die verwendete Nebelkammer hatte einen Durchmesser von 14 cm und war nach dem Membrantyp gemäß einem von Blackett [7] angegebenen Prinzip gebaut. Sie enthielt als Dampfquelle ein Gemisch aus Äthylalkohol und Wasser im Verhältnis 2:1; der Gasdruck betrug im expansierten Zustand 1,35 Atm. Das Expansionsverhältnis wurde möglichst hoch gewählt, damit sicher an allen Ionen Kondensation stattfindet; es lag zwischen 1,12 und 1,13. Die Beleuchtung der Nebelkammer erfolgte von oben mit einer stabförmigen Xenon-Blitzlampe BL aus Quarzglas (Länge 18 cm, Innendurchmesser 5 mm, Xenondruck etwa 120 Torr), in der pro Lichtblitz eine Energie von etwa 400 Joule umgesetzt wurde. Mit einer wassergefüllten Zylinderlinse L wurde das Licht dieser Blitzlampe so gebündelt und anschließend ausgeblendet, daß in der Nebelkammer eine beleuchtete Zone von nur 1 cm Tiefe entstand. Die Aufnahmen erfolgten auf hochempfindlichem Agfa-Fluorapidfilm; als Kamera diente eine Robot mit Zeiss-Objektiv Sonnar 1:2, f = 8,5 cm. Das Objektiv wurde zur Vermeidung von Tropfenüberlappungen auf dem Film auf 1:4 abgeblendet. Bei einer Verkleinerung von 2,5:1 entsprach das Negativbild einem Bildausschnitt von 6×6 cm² in der Nebelkammer. Es wurde also nicht die ganze Bahnlänge der Elektronen in der Kammer aufgenommen, weil bei weiterer Verkleinerung das Auflösungsvermögen für einzelne Tropfen zu stark zurückgehen würde. In-

folge der geringen Tiefenschärfe der Optik und der gleichfalls geringen Tiefe der beleuchteten Zone ergaben sich keine Störungen durch Bahnen vor oder hinter der scharf abgebildeten Mittelebene der Nebelkammer.

Der Einschuß der Elektronen in die Nebelkammer erfolgte durch Steuerung des Wehnelt-Zylinders am Injektor der Elektronenschleuder. Der Elektronenstrom wurde durch eine hohe negative Vorspannung gesperrt, die bei jeder Expansion kurzzeitig über ein RC-Glied erniedrigt wurde. Die Zeitkonstante war so bemessen, daß jeweils nur 1 bis 2 Strahlungsimpulse die Schleuder verlassen konnten. Durch Herunterregeln

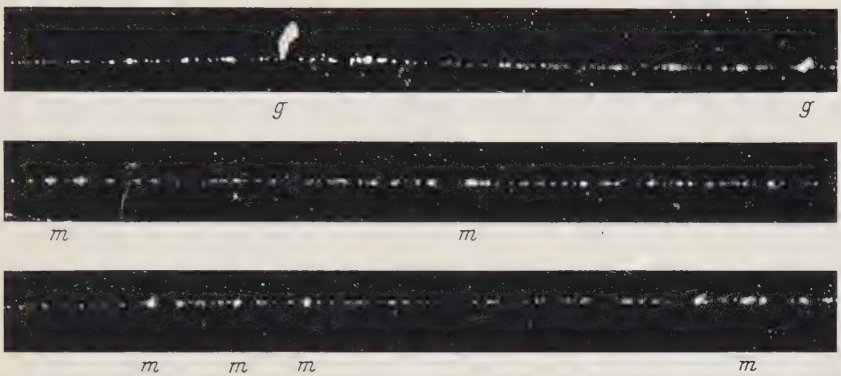

Fig. 6. Beispiele von Elektronenbahnen in der Nebelkammer (etwa 1,8fach vergrößert).

der Heizung der Kathode ließ sich dann leicht erreichen, daß bei jeder Expansion nur wenige Elektronenbahnen in der Nebelkammer erschienen. Ein rotierender Nockenschalter, angetrieben durch einen Synchronmotor, steuerte die für die Nebelkammer nötigen Vorgänge. Um den Einfluß der Tropfengröße auf das Auflösungsvermögen zu untersuchen, wurden die Aufnahmen in drei Gruppen mit unterschiedlicher Verzögerung (0,03, 0,10 und 0,17 sec) zwischen Elektroneneinschuß und Beleuchtung vorgenommen.

b) Auswertung und Ergebnis.

In Fig. 6 sind einige Elektronenbahnen aus vergrößerten Nebelkammeraufnahmen wiedergegeben, welche als Beispiele die Verteilung der Nebeltropfen, d.h. der primären Ionisationsakte, längs der Bahnen zeigen sollen. Sie lassen die statistischen Schwankungen sowie die unterschiedliche Tropfengröße gut erkennen. Es kann angenommen werden, daß die zahlenmäßig weit überwiegenden kleinen Tropfen je 1 bis 2 Ionenpaare enthalten, die in Fig. 6 besonders markierten größeren Tropfen Ionenhaufen energiereicher Sekundärelektronen sind.

Zum Auszählen wurden die Aufnahmen mit 10facher Vergrößerung projiziert. Die Auswertung beschränkte sich auf scharfe Bahnen im

Mittelteil der Nebelkammer, also von Elektronen, die keine starke Ablenkung im Eintrittsfenster erfahren haben. Fehler in der Längenbestimmung ausgezählter Bahnstücke durch schräg nach vorne oder hinten laufende Spuren sind durch die geringe Tiefenschärfe der Optik praktisch ausgeschlossen.

Auf insgesamt 300 Nebelkammeraufnahmen wurden etwa 23 000 Tropfen bei einer Gesamtlänge der Elektronenbahnen von etwa 8 m ausgezählt. An der ermittelten Zahl ist zunächst eine Korrektur für gegenseitige Überdeckung einzelner Tropfen anzubringen. Diese ist abhängig vom mittleren Tropfenabstand und vom mittleren Tropfendurchmesser, letzterer wieder von der Beleuchtungsintensität bzw. der Blendenöffnung der Kamera und vom Zeitpunkt zwischen Elektroneneinschuß und Aufnahme. Ist diese Verzögerung zu gering, so sind die kleinen Tropfen noch nicht auf photographierbare Größe angewachsen; wird sie zu groß, so nimmt die Tropfenüberlappung zu. Die Überdeckungskorrektur ist selbst mit einer gewissen Unsicherheit behaftet; es wurde dafür eine von Kunze [8] angegebene Formel benutzt:

$$N_0 = N^2 \cdot d/(1 - e^{-N d})$$

(N = gezählte Tropfenzahl pro cm; N_0 wahre Tropfenzahl pro cm; d = mittlerer Tropfendurchmesser).

In Tabelle 1 sind die gemessenen und korrigierten Tropfenzahlen für die drei verschiedenen Aufnahmegruppen zusammengestellt. Für die Abschätzung des mittleren Tropfendurchmessers d wurden dabei große Ionenhaufen nicht berücksichtigt, da sie im Verhältnis zu kleineren Tropfen zu selten auftreten.

Tabelle 1. *Korrektur der Tropfenzahlen in Abhängigkeit von der Verzögerung zwischen Elektroneneinschuß und Aufnahme.*

Verzögerung (sec)	Tropfendurchmesser d (cm)	Tropfenzahl pro cm		Gesamtzahl
		gezählt N	korr. N_0	
0,03	0,004	31,1	33,1	4931
0,10	0,008	29,4	33,0	9440
0,17	0,010	27,7	31,8	8041
		Mittelwert:	32,4	

Weiter ist zu berücksichtigen, daß die Elektronen in der Nebelkammer nicht nur die N_2- und O_2-Moleküle der Luft ionisieren, sondern auch Moleküle des Alkohol-Wasserdampf-Gemisches. Diese Ionisation im Dampf läßt sich hinreichend genau abschätzen unter der Annahme, daß die Ionisation in den einzelnen Gaskomponenten proportional dem Partialdruck und der Elektronendichte jeder Komponente ist. Der Partialdruck des Dampfgemisches im Gleichgewicht mit der Flüssigkeit

wurde einer Arbeit von GAUTIER und RUARK [9] entnommen. Es ergab sich für die Ionisation im Dampf ein Wert von 1,6 Ionenpaare/cm, für die Ionisation in Luft allein also 30,8 Ionenpaare/cm.

Nach Umrechnung auf 760 Torr und 0° C ergibt sich damit die primäre spezifische Ionisation in Luft zu

$$N_p = 25{,}4\ \mathrm{cm}^{-1}.$$

Unter Berücksichtigung der Energieverluste in den Kupferfolien des Elektronenschleuder- und Nebelkammerfensters und auf dem dazwischen liegenden Luftweg erhält man für die Energie der Elektronen in der Nebelkammer den Wert 4,8 MeV.

Mit dem Wert für die totale spezifische Ionisation $N_t = 62{,}5\ \mathrm{cm}^{-1}$ nach Abschnitt 1 erhält man also für das Verhältnis totale zu primäre Ionisation den Wert

$$N_t/N_p = 2{,}5.$$

Zu einem primär erzeugten Ionenpaar kommen also im Mittel noch 1 bis 2 sekundär erzeugte Ionenpaare.

Vergleichbare Messungen liegen nur vor von WILLIAMS und TERROUX [10] in Sauerstoff bei 1,4 MeV mit $N_p = 22{,}2$ und von SKRAMSTAD und LAUGHRIDGE [11] in Stickstoff bei 2 MeV mit $N_p = 19$; beide liegen also merklich tiefer als der von uns ermittelte Wert. Näheres über diesen Unterschied wird man aber erst sagen können, wenn noch weitere Messungen über einen größeren Energiebereich vorliegen; es sei nur bemerkt, daß bei verschiedenen Nebelkammermessungen die jeweils benutzten Korrekturen das Ergebnis merklich beeinflussen. Theoretisch ist die primäre spezifische Ionisation von BETHE [5] berechnet worden, wobei sich eine Formel ergibt, die ähnlich dem Ausdruck für den mittleren Energieverlust ist. Die Formel gilt exakt nur für Wasserstoff und es treten darin Zahlenwerte auf, die für andere Elemente nur empirisch aus Messungen ermittelt werden können. Auf einen Vergleich mit dieser Berechnung muß deshalb verzichtet werden.

Über die Verteilung der sekundären Ionisationsprozesse können nach unseren Aufnahmen nur einige qualitative Angaben gemacht werden. Es wurden dazu die gelegentlich auftretenden Ionenhaufen in zwei Gruppen eingeteilt und besonders ausgezählt, die an den in Fig. 6 wiedergegebenen Beispielen als mittlere (m) bzw. große (g) Tropfen markiert sind. Diese Auszählung ergab:

1,4 mittlere Tropfen pro cm Bahnlänge,

0,27 große Tropfen pro cm Bahnlänge.

Über die Anzahl der Ionen in diesen mittleren und großen Tropfen kann man auf folgendem Wege zu einer angenäherten Abschätzung

kommen: Etwa 2,5% der primären Ionisierungen erfolgen beim Stickstoff bzw. Sauerstoff in der K-Schale; diese Zahl ergibt sich, wenn man als grobe Annäherung gemäß der klassischen Theorie annimmt, daß die Ionisierungswahrscheinlichkeit in einer bestimmten Schale proportional n/I ist, wobei n die Zahl der Elektronen in der betrachteten Schale und I die zugehörige Ionisierungsarbeit bedeuten. In nahezu allen Fällen tritt bei diesen leichten Elementen bei Ionisierung der K-Schale ein Auger-Elektron auf (Ausbeute $> 99\%$; vgl. [12]), welches seinerseits etwa 10 bis 12 weitere Ionenpaare erzeugen kann. 2,5% der primär gebildeten Tropfen, d.h. 0,6 Tropfen pro cm oder rund die Hälfte der gezählten mittleren Tropfen müssen also mindestens etwa 12 Ionenpaare enthalten. Wenn man die gleiche Zahl von Ionenpaaren auch für die übrigen Tropfen mittlerer Größe annimmt, ergibt sich, daß diese mittleren Tropfen einen Beitrag von 17 Ionenpaaren pro cm zur Gesamtzahl von 62,5 Ionenpaaren pro cm beitragen. Wenn man weiter annimmt, daß die kleinen Tropfen im Mittel 1,5 Ionenpaare enthalten, also einen Anteil von 36 Ionenpaaren pro cm an der Gesamtionisation liefern, so bleibt ein Rest von 9 bis 10 Ionenpaaren pro cm, der sich auf die gezählten 0,27 großen Tropfen verteilt. Diese müssen dann also im Mittel je etwa 35 Ionenpaare enthalten.

Wir danken für besonderes Entgegenkommen und Unterstützung dem Direktor der Erlanger Medizinischen Universitätsklinik, Herrn Professor Dr. K. Matthes, Herrn Priv.-Doz. Dr. F. Wachsmann, Erlangen, sowie den Siemens-Reiniger-Werken, schließlich der Deutschen Forschungsgemeinschaft für finanzielle Förderung der Arbeiten an der Elektronenschleuder.

Literatur.

[1] Gund, K., u. H. Reich: Z. Physik **126**, 383 (1949). — [2] Brode, R. B., and G. D. Bagley: Phys. Rev. **56**, 209 (1939). — [3] Hazen, W. E.: Phys. Rev. **63**, 107 (1943). — [4] Ovadia, J., J. S. Laughlin, J. W. Beattie and W. J. Henderson: Phys. Rev. **88**, 165 (1952). — [5] Vgl. Handbuch der Physik, 2. Aufl., Bd. XXIV/1 (Beitrag H. Bethe). Berlin: Springer 1933. — [6] Wilson, R. R.: Phys. Rev. **60**, 749 (1941). — [7] Blackett, P. M. S.: Proc. Roy. Soc. Lond. A **146**, 281 (1934). — [8] Kunze, P.: Z. Physik **83**, 17 (1933). — [9] Gautier, T. N., and A. E. Ruark: Phys. Rev. **57**, 1040 (1940). — [10] Williams, E. J., and F. R. Terroux: Proc. Roy. Soc. Lond. A **126**, 289 (1930). — [11] Laughridge, D. H., and H. K. Skramstad: Phys. Rev. **50**, 677 (1936). — [12] Crone, W.: Ann. Physik (5), **27**, 405 (1936).

Würzburg, Physikalisches Institut der Universität.

Druck der Universitätsdruckerei H. Stürtz AG., Würzburg